

УДК 551.594.221

Г.М.КОЛИУШКО, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;*П.Н.МЕЛЬНИКОВ*, инженер, НТУ «ХПИ»;*О.С.НЕДЗЕЛЬСКИЙ*, инженер, НТУ «ХПИ»;*А.А.ПЕТКОВ*, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;*С.С.РУДЕНКО*, инженер, НТУ «ХПИ»;*А.Ю.ЧЕРНУХИН*, инженер, аспирант, НТУ «ХПИ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРАЖЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ДЛИННОЙ ИСКРОЙ

У статті представлені результати експериментальних досліджень статистичних характеристик координат ураження іскровим розрядом площини в системі електродів «стрижень – площина», адекватної реальній моделі розвитку розряду блискавки в зоні орієнтації напряму на об'єкти, що знаходяться на поверхні землі. Представлені електричні параметри генератора, що моделює іскровий розряд. Проведено аналіз статистичних характеристик отриманих результатів та їх кореляції з геометрією моделюючої електродної системи.

The results of the experimental researches of the statistic characteristics of the coordinates of the spark discharge strikes to the plane in the electrode system «rod – plane» which is equal to the lightning in the zone of the orientation to the objects on the ground are presented. The electric parameters of the generator which can modelate the spark discharge are given. The analysis of the statistical characteristics of the received results and there connection with geometry of the simulator electrode system are described in this article.

В статье представленные результаты экспериментальных исследований статистических характеристик координат поражения искровым разрядом плоскости в системе электродов «стержень – плоскость», адекватной реальной модели развития разряда молнии в зоне ориентации направления на объекты, которые находятся на поверхности земли. Представлены электрические параметры генератора, который моделирует искровой разряд. Проведен анализ статистических характеристик полученных результатов и их корреляции с геометрией моделирующей электродной системы.

Постановка проблемы. Молниезащите объектов различного назначения в настоящее время уделяется все более значительное внимание, что связано, в первую очередь, с опасными, а порой и катастрофическими последствиями поражения молнией различных объектов, обеспечивающих жизнедеятельность крупных промышленных центров. Одним из аспектов, обеспечивающих разработку систем молниезащиты, является совершенствование методов проектирования, которые базируются на соответствующих теоретических и экспериментальных данных по поражению разрядами молнии. Последнее обстоятельство требует разработки моделей развития разряда молнии и формирования зоны поражения этим разрядом различных объектов.

Анализ публикаций. Несмотря на значительный объем научных публикаций по вопросам молниезащиты и физике развития разряда молнии, в

настоящее время исследования, связанные с распределением точек поражения различных объектов, представлены ограниченным рядом работ.

В одной из первых работ этого ряда [1] сделана попытка описания статистическими методами поражения системы из трех стержней (защищаемый объект-стержень и два стержня-молниеотвода). В работе доказывается, что зависимость коэффициента поражаемости от расстояния между молниеотводами хорошо описывается функцией нормального распределения.

В работе [2] приводятся экспериментальные данные по распределению точек поражения плоскости, на которой расположен объект-стержень. Приведенные данные позволяют сделать качественную оценку плотности распределения точек поражения.

Следующий шаг в описании распределения точек поражения плоскости сделан в [3]. Работа содержит графический материал, который позволяет дать численную оценку параметрам распределения мест поражения электрода-плоскости разрядами длинной искры.

Таким образом, приведенный анализ показывает, что одним из центральных направлений исследований в области молниезащиты является изучение распределения мест поражения различных объектов, так как только наличие данной информации позволит с достаточной полнотой изучить эффекты, вносимые установкой молниеотводов.

Целью настоящей работы является формирование и анализ набора экспериментальных данных по статистическому распределению точек поражения заземленной плоскости в системе электродов «стержень – плоскость».

Материалы и результаты исследований. Формирование набора экспериментальных данных проводилось на базе высоковольтного электрофизического стенда ГИН-1,2 (НИПКИ «Молния»), у которого был модернизирован генератор импульсов напряжения (ГИН) с целью получения импульса напряжения с амплитудно-временными параметрами, удовлетворяющими цели запланированных работ.

В соответствии с рекомендациями, основанными на опыте исследования характеристик молниевых разряда, представленными в ряде публикаций [4–6], был проведен ряд работ по реализации в испытательных стендах амплитудно-временных параметров импульсов напряжения и тока, адекватных физической модели развития молнии в системе «облако – земля».

Эквивалентная электрическая схема разрядного контура стенда представлена на рис. 1

В табл. 1 приведены расчетные значения величин параметров элементов схемы разрядного контура стенда ГИН-1,2 представленной на рис. 1.

Максимальное напряжение на выходе (на РП) ГИН-1,2 – 800 кВ. Полярность импульса положительная.

Общий вид испытательного стенда показан на рис. 2. На рис. 3 показаны

основные геометрические размеры электродной системы испытательного стенда ГИН-1,2, реализующие пробой промежутка «стержень-плоскость».

Стержневой электрод 3 представляет собой стержень, изготовленный из стального шестигранника (размер «под ключ» $S = 19$ мм) длиной 800 мм, закрепленного по центру симметрии плоского верхнего (высоковольтного) электрода с размерами (в плане) (4000×5240) мм².

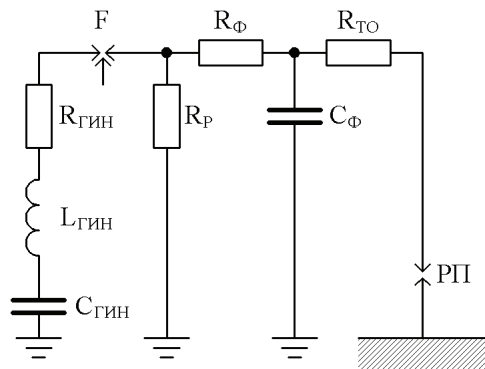


Рисунок 1 – Эквивалентная электрическая схема разрядного контура стенда: $C_{ГИН}$, $L_{ГИН}$, $R_{ГИН}$ – емкость, индуктивность и активное сопротивление разрядной цепи ГИН соответственно; F – эквивалент управляемого разрядника ГИН; R_P – разрядный резистор; $R_{ТО}$ – токоограничивающий резистор; $R_Ф$ – резистор, формирующий фронт импульса; $C_Ф$ – емкость, формирующая фронт импульса; $РП$ – разрядный промежуток.

Таблица 1 – Параметры элементов разрядного контура

	$C_{ГИН}$, нФ	$L_{ГИН}$, мкГн	$R_{ГИН}$, Ом	R_P , кОм	$R_Ф$, кОм	$C_Ф$, нФ	$R_{ТО}$, кОм
ГИН-1,2	30	13	130	415	680	0,2	0

Верхний электрод подвешен над нижним с помощью четырех капроновых канатов, закрепленных по углам электрода. Система подвеса дает возможность регулировки расстояния h между плоскостями. Верхний электрод снабжен по краям противокоронными экранами.

Нижний электрод представляет собой заземленную проводящую плоскость с размерами (4000×6690) мм². Длина разрядного промежутка ($РП$) $h = 1260$ мм.

Характерные осциллограммы напряжения на $РП$ показаны на рис. 4 и рис. 5. Фотографии импульсных разрядов показаны на рис. 6 и рис. 7.

При анализе осциллограмм импульса напряжения установлено, что при времени нарастания напряжения до максимума (1000 мкс) пробой $РП$ происходил в диапазоне времен от 400 мкс до 850 мкс, что соответствует 75 % и

98 % максимального напряжения импульса.

Регистрация мест поражения производилась с использованием бумажного шаблона, накладываемого на электрод-плоскость (рис. 8).

Как видно из рис. 3, эксперименты проводились на стенде, у которого система электродов не обладает полной симметрией относительно вертикальной оси верхнего электрода. Данное обстоятельство потребовало проверки влияния несимметричности электродной системы на распределение точек поражения, ввиду того, что развитие разряда связано с конфигурацией электрического поля [1, 2].



Рисунок 2 – Общий вид стенда ГИН-1,2

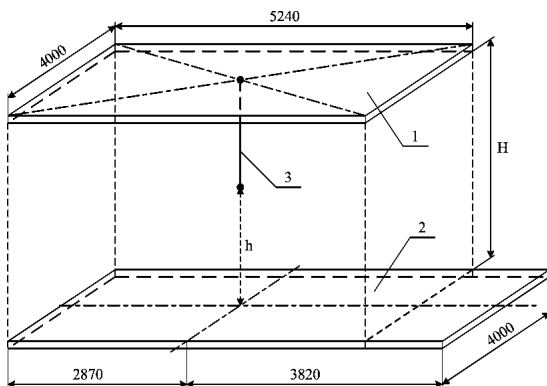


Рисунок 3 – Электродная система:

1 – верхняя плоскость (высоковольтный электрод); 2 – нижняя плоскость (заземленный электрод); 3 – стержневой электрод; h – длина воздушного разрядного промежутка; H – расстояние между верхним и нижним плоскими электродами

На рис. 9 показаны размеры нижнего электрода разрядной системы. Точка «О» является проекцией вертикальной оси верхнего электрода – стержня. Цифрами 1-4 обозначены секторы, используемые при анализе распределения точек поражения. Каждый сектор имеет угол 90° и располагается симметрично одной из полуосей.

Полученные данные по распределению точек поражения были сгруппированы по указанным секторам. Результаты приведены в табл. 2. Как видно из таблицы, в сектор 3 попало наименьшее количество точек поражения.

Очевидно, что при полной симметрии электродной системы вероятность попадания в любой сектор $p_0 = 0,25$. Из таблицы видно, что наблюдаемые относительные частоты попадания в сектор w_i отличаются от вероятности p_0 как в большую, так и в меньшую сторону. Оценку существенности отклоне-

ния наблюдаемых относительных частот от вероятности p_0 произведем с использованием следующего критерия [7]:

$$U_{\text{набл}} = \frac{(w_1 + p_0) \cdot \sqrt{n}}{\sqrt{p_0 \cdot (1 - p_0)}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{набл}}$ – наблюдаемое значение критерия; w_1 – относительная частота; p_0 – гипотетическая вероятность; n – количество экспериментальных данных.

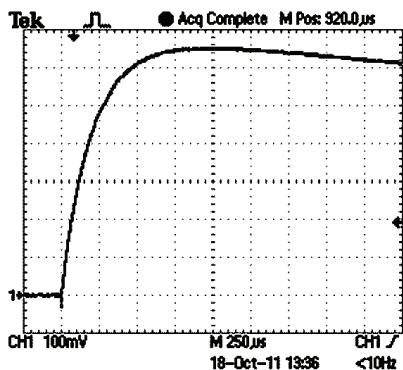


Рисунок 4 – Осциллограмма импульса напряжения при отсутствии пробоя РП

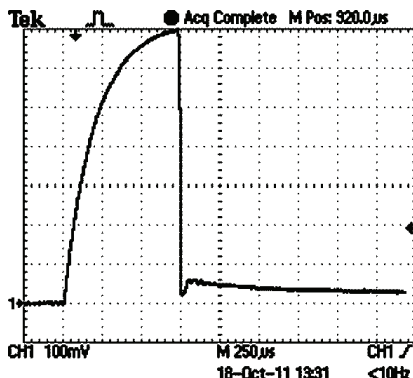


Рисунок 5 – Осциллограмма импульса напряжения при пробое РП в момент времени $t = 725$ мкс

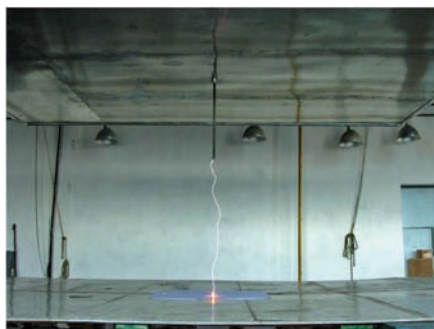


Рисунок 6 – Импульсный пробой РП

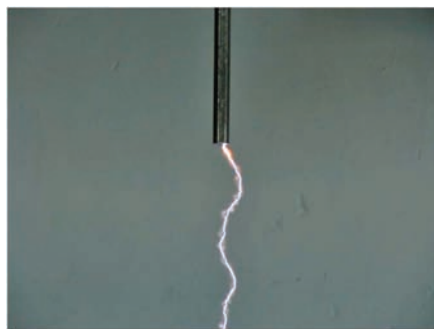


Рисунок 7 – Фрагмент канала разряда со стержня

Результаты вычисления наблюдаемого критерия по (1) приведены в табл. 2.

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ проверяем нулевую гипотезу H_0 : о равенстве неизвестной вероятности p (оценкой которой является w_i) гипотетической вероятности p_0 при конкурирующей гипотезе H_1 : $p > p_0$ (если $w_i > p_0$) или $p < p_0$ (если $w_i < p_0$).



Рисунок 8 – Фрагмент шаблона с отмеченными точками сквозного пробоя единичным разрядом

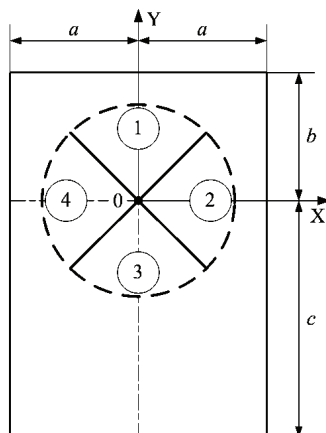


Рисунок 9 – Схема размеров электрода – плоскости:
 $a = 2$ м; $b = 2,87$ м; $c = 3,82$ м

Таблица 2 – Результаты обработки данных экспериментов

Номер сектора	Направление по осям	Количество поражений, n_i	Относительная частота, w_i	$U_{\text{набл}}$
1	+Y	61	0,261	0,377
2	+X	67	0,386	1,283
3	-Y	46	0,197	-1,887
4	-X	60	0,256	0,226

Критическое значение критерия $U_{\text{кр}} = 1,645$ [7].

Гипотеза H_0 принимается если:

$$\begin{aligned} U_{\text{набл}} < U_{\text{кр}}, \text{ при } H_1: p > p_0; \\ U_{\text{набл}} > -U_{\text{кр}}, \text{ при } H_1: p < p_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Как видно из табл. 2, для секторов 1, 2 и 4 исходя из условий (2) принимается нулевая гипотеза H_0 , что позволяет считать несущественным превышение относительных частот над вероятностью p_0 ; для сектора 3 нулевая гипотеза отвергается и принимается конкурирующая гипотеза $H_1: p < p_0$.

Это позволяет сделать вывод, что увеличенное значение размера «с» (см. рис. 9) существенно повлияло на количество точек поражения в направлении «-Y».

Для теоретического обоснования выявленного факта рассмотрим геометрическую модель поражения плоскости разрядом, показанную на рис. 10.

На изоляционной поверхности 1 расположена проводящая плоскость 2 имеющая форму бесконечно тонкого диска радиусом r_{max} . Над плоскостью 2 на оси диска располагается стержень 3, нижний конец которого находится на

высоте H , над плоскостью. Траектория прямолинейного разряда со стержня 3 на плоскость 1 определяется углом движения Θ , имеющим случайный характер. Угол движения Θ изменяется в интервале от 0 до Θ_{\max} . Определим плотность распределения вероятности поражения точек, расположенных на радиусе плоскости прямолинейным разрядом. Из рис. 10 видно, что

$$\Theta_{\max} = \arctg \frac{r_{\max}}{H}. \quad (3)$$

Для произвольного угла движения Θ , величина r определяется из соотношения

$$r = H \cdot \tg \Theta. \quad (4)$$

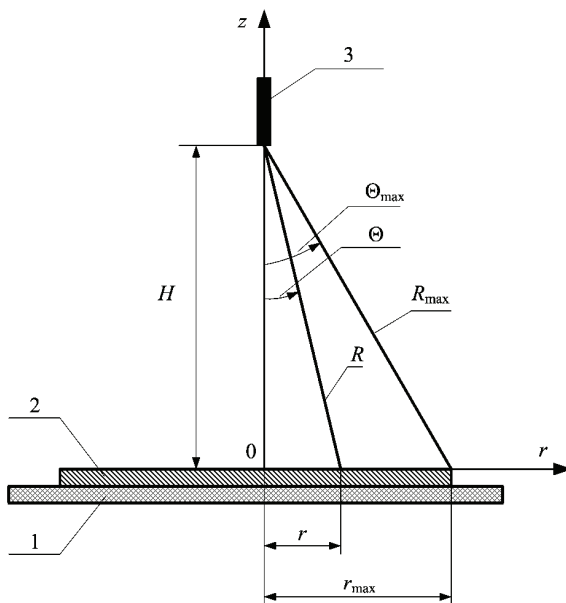


Рисунок 10 – Модель поражения осесимметричной плоскости прямолинейным разрядом

Пусть угол движения Θ равномерно распределен в интервале $\left[0, \arctg \frac{r_{\max}}{H}\right]$. Тогда используя рекомендации, изложенные в [8], можно показать, что плотность распределения поражений окружности радиуса r определится из следующего соотношения

$$g(r) = \frac{1}{\arctg \frac{r_{\max}}{H}} \cdot \frac{1}{H} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{r}{H}\right)^2}, \quad (5)$$

где $r \in [0, r_{\max}]$; при $r \notin [0, r_{\max}]$ соответственно $g(r) = 0$.

На рис. 11 показаны графики изменения $g(r)$, рассчитанные по (5) для характерных размеров электрической системы, использованной при экспериментальных исследованиях (см. рис. 3).

Как видно из рис. 11 плотность вероятности $g(r)$ тем меньше, чем больше радиус диска. Таким образом, полученные расчетные данные по характеру изменения согласуются с экспериментальными и объясняют уменьшение количества поражения плоскости в направлении «–Y». Проведенное численное моделирование процесса поражения оси [9] показало результаты аналогичные, приведенным на рис. 11.

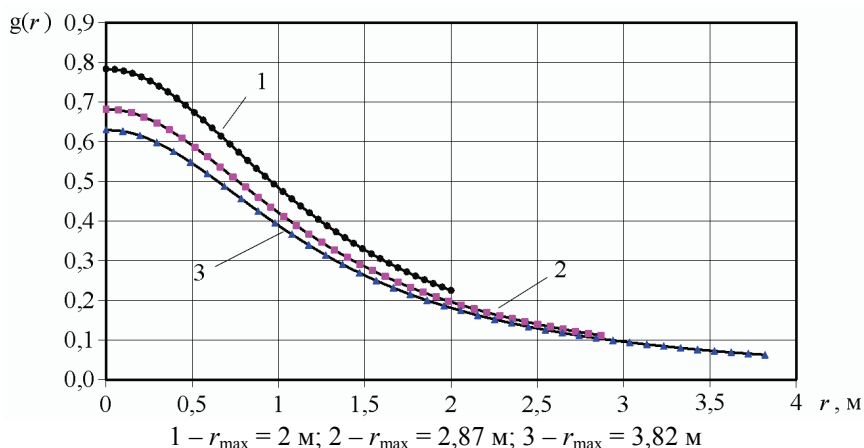


Рисунок 11 – Изменение плотности вероятности поражения точек радиуса r

Выводы

1. Получены экспериментальные данные по поражению длинной искрой заземленной плоскости.

2. Проведенный анализ экспериментальных данных, теоретические расчеты и численное моделирование показали, что для обеспечения симметричности распределения точек поражения по различным направлениям расстояния по осям от проекции вертикальной оси верхнего электрода-стержня до края нижнего электрода плоскости не должны отличаться более чем в 1,43 раза.

Материалы статьи будут использованы для планирования дальнейших экспериментальных исследований по поражению длинной искрой различных объектов.

Список литературы: 1. К вопросу об оценке защитного действия молниеотводов / Г.Н. Александров, М.М. Зеленецкий, В.Л. Иванов и др. // Известия академии наук СССР. Энергетика и транспорт. – 1970. – № 3. – С. 48-54. 2. Об ориентировке канала длинной искры / Г.Н. Александров,

В.Л. Иванов, Э.М. Базелян, Е.С. Садыхова // Электричество. – 1973. – № 3. – С. 63-66. 3. Волкова О.В. Поражаемость искровым разрядом стержня на плоскости / О.В. Волкова, А.Р. Корявин // Электричество. – 1991. – № 5. – С. 52-55. 4. Александров Г.Н. Молния и молниезащита / Г.Н. Александров. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 280 с. – ISBN 5-7422-1432-4. 5. Базелян Э.М. Физика молнии и молниезащиты / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с. – ISBN 5-9221-0082-3. 6. Куприенко В.М. Методика и результаты испытаний по определению угла защиты α для отдельно стоящих стержневых и тросовых молниеотводов / В.М. Куприенко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Техніка і електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 17. – С. 24-32. 7. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике / В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2004. – 404 с. 8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель – М.: Высшая школа, 2002. – 575 с. 9. Колиушко Д.Г. Статистическая двумерная модель разряда молнии на бесконечный прямолинейный проводник / Д.Г. Колиушко, А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Техніка і електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХПІ». – 2011. – № 16. – С. 118-126.

Поступила в редколлегию 14.03.2012.